



STUDIO TEORICO SPERIMENTALE PER L'OTTIMIZZAZIONE DI BARRIERE PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO DA COLATE DI DETRITO

Federico Vagnon

Università di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra
federico.vagnon@unito.it

Anna Maria Ferrero

Università di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra
anna.ferrero@unito.it

Marina Pirulli

Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica
marina.pirulli@polito.it

Andrea Segalini

Università di Parma, Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente e del Territorio e Architettura
andrea.segalini@unipr.it

Sommario

L'argomento di questa nota è l'applicazione del Rock Engineering System (RES) alla progettazione di barriere flessibili per mitigare il rischio indotto dai fenomeni di colata detritica.

Lo studio dell'interazione tra colata detritica e barriera flessibile è una sfida importante in quanto coinvolge differenti aspetti riguardanti sia le condizioni del bacino che le caratteristiche della struttura. Dal punto di vista della simulazione del fenomeno, questa complessità determina il ricorso a modelli numerici semplificati. Un'analisi a priori dell'influenza dei differenti aspetti può quindi essere utile per concentrarsi sulla corretta definizione del problema.

L'applicazione del RES permette di investigare, attraverso l'utilizzo di una matrice di interazione che riassume i parametri geotecnici chiave, l'innescò, le condizioni di flusso, il processo di deposizione e l'interazione con le opere di difesa. L'obiettivo è di quantificare i termini "off-diagonal" in modo da poter valutare il rischio residuo dopo la costruzione della barriera, usando sia back-analysis di eventi reali sia dati da letteratura.

Questa metodologia è stata applicata per analizzare un evento di debris flow nella Alpi Occidentali. In particolare, per la valutazione delle caratteristiche del flusso utili per la progettazione di una barriera flessibile è stata svolta un'analisi numerica con l'ausilio di un modello sviluppato dagli Autori (Brighenti et al, 2013). Per la stima delle velocità e delle altezze di flusso si è utilizzato il codice numerico RASH^{3D} (Pirulli, 2010); tale codice si basa sul concetto di fluido equivalente implementando le equazioni di Saint Venant.

La determinazione dell'intensità dei possibili percorsi della matrice di interazione ha permesso di concentrarsi sulla valutazione dei parametri funzionali alla progettazione delle barriere flessibili.

1. Introduzione

I debris flows sono fenomeni che si formano laddove masse di detrito ad ampio spettro granulometrico e sature d'acqua si mobilitano lungo un pendio per effetto della gravità. L'elevata velocità di tali processi e l'interazione tra la componente fluida e quella solida, giocano un ruolo fondamentale nella dinamica di questi fenomeni che, in aggiunta alla difficoltà di previsione, li rendono tra i più pericolosi e distruttivi movimenti franosi esistenti.

La necessità di proteggere infrastrutture e centri abitati dall'azione devastante dei debris flows ha

favorito lo sviluppo di opere di protezione quali barriere rigide in cemento armato e rilevati in terra. A partire dagli anni novanta sono state impiegate con successo barriere flessibili formate da reti e funi portanti in acciaio. L'elevata deformabilità consente di assorbire la forza di impatto e di ridurre la mobilità del processo; inoltre, la struttura a maglie permette il deflusso dell'acqua con conseguente riduzione della spinta del detrito sulla struttura stessa.

Tali barriere vengono progettate utilizzando gli strumenti di calcolo messi a punto per la caduta massi, fenomeno per il quale sono disponibili maggiori esperienze sperimentali, in quanto non esistono, attualmente, specifiche normative tecniche rivolte all'impatto delle colate.

Questa ricerca si focalizza sull'analisi dei parametri che maggiormente influenzano la progettazione di sistemi di protezione flessibili mediante il Rock Engineering System (RES). I parametri individuati consentiranno di sviluppare e migliorare il metodo di progettazione di barriere flessibili a funi portanti proposto dagli Autori (Brighenti et al., 2013).

2. Rock Engineering System (RES)

L'approccio ad un problema ingegneristico prevede di identificare i parametri e le variabili che condizionano il progetto. In particolare, è doveroso definire se e come un parametro è influenzato da altre variabili esterne al sistema. Riflettendo su tali questioni, appare evidente la necessità di uno studio delle relazioni che intercorrono tra i differenti parametri. L'approccio migliore per trovare una risposta esaustiva a questi quesiti è quello fornito dal Rock Engineering System (RES) ideato da Hudson J.A. (1992). Tale metodologia nasce dall'esigenza di superare i limiti di un "modello sintetico", ovvero un modello matematico rappresentativo di una porzione dell'ammasso roccioso con limitata estendibilità all'intero sistema, a favore di un "modello analitico" che consideri l'ammasso nella sua totalità e definisca tutti i parametri coinvolti.

2.1 Matrice di interazione

La rappresentazione dei parametri principali che influenzano il fenomeno, la loro reciproca interazione e il comportamento opera ingegneristica/ammasso roccioso sono facilmente visualizzabili utilizzando un accorgimento grafico definito come matrice di interazione. I parametri principali che definiscono il fenomeno sono riportati sulla diagonale principale (diagonal terms, P_i) mentre l'influenza di un parametro sull'altro è riportata nella corrispondente posizione (off-diagonal terms) all'intersezione tra i due parametri principali. I parametri principali sono ordinati gerarchicamente seguendo una precisa disposizione logica: prima i parametri legati all'ammasso roccioso, poi quelli correlati alle condizioni in sito ed infine il progetto ingegneristico.

Se ai termini non diagonali si associa un valore numerico, la matrice di interazione diventa una matrice di calcolo ed è possibile definire numericamente la dominanza di un parametro su un altro e rappresentare graficamente i rapporti di causa/effetto.

Esistono numerosi metodi di codifica della matrice sia di tipo qualitativo che quantitativo: il più utilizzato (Hudson J.A., 1992) è sicuramente l'ESQ (Expert Semi-Quantitative) che introduce una valutazione da 0, nessuna interazione, a 4, interazione critica. La sfida più ardua è passare da una valutazione semiquantitativa ad una totalmente quantitativa, basata su analisi statistiche di valori reali derivati da studi di back analysis.

Il rischio intrinseco dell'interazione di più parametri che agiscono contemporaneamente e consecutivamente può essere rappresentato da percorsi che collegano i termini diagonali e valutato moltiplicando i termini tra di loro.

2.2 Applicazione della matrice di interazione al fenomeno debris flow

La Fig.1a riporta la matrice d'interazione, proposta dagli Autori, che consente di valutare il

comportamento debris flow-barriera flessibile. È necessario precisare che la matrice in questione si riferisce a debris flow alpini la cui origine è conseguenza dello scioglimento del manto nevoso che determina una riduzione della resistenza a taglio del detrito.

La matrice è formata da sei parametri principali: il substrato/ammasso roccioso, il detrito, la morfometria, gli agenti esterni, in particolare temperatura e presenza di acqua, ed infine la barriera. I primi due parametri riguardano le caratteristiche dell'ammasso roccioso, le quali condizionano sia la natura che il volume di detrito, morfometria e agenti esterni identificano il sito e, per ultima, la barriera rappresenta l'interazione tra opera ingegneristica e fenomeno naturale.

PRIMAVERA / ESTATE					PRIMAVERA / ESTATE				
SUBSTRATO / AMMASSO ROCCIOSO (P1)	Il detrito può derivare direttamente dall'alterazione del substrato	Spesso segue l'andamento del bacino	Influenza la velocità di propagazione delle onde sismiche	Ancoraggio / fondazioni	P1	3	2	2	4
Il detrito si comporta come coltre protettiva del substrato roccioso	DETRITO (P2)	Variatione locale delle caratteristiche del pendio	Influenza la velocità di propagazione delle onde sismiche	Volume di impatto/ritenzione	2	P2	3	2	5
Pendenze elevate possono determinare dei crolli	Volume del conoide	MORFOMETRIA (forma, dimensioni dei versanti, spessore) (P3)	La pendenza è conseguenza del flusso superficiale e sotterraneo	Energia di impatto	3	5	P3	3	5
Alterazione chimico/fisica / Aumento della permeabilità	Riduzione della coesione per effetto del disgelo	Flusso di acqua dettato dall'orientazione del pendio e dalla fratturazione	AGENTI ESTERNI (Temperatura, Pioggia, Sisma, Modificazioni antropiche) (P4)	Tempo di ritorno	4	3	3	P4	4
Possibile miglioramento localizzato delle caratteristiche meccaniche	Modifica le proprietà del detrito che si deposita (compattazione - riduzione porosità)	In caso di riempimento la barriera modifica l'asta torrentizia	Non ha effetti diretti	BARRIERA / CONSOLIDAMENTI (P5)	2	3	4	1	P5

Fig 1. Matrice di interazione 5x5 applicata ai debris flow alpini originatisi in seguito all'aumento di temperatura e conseguente scioglimento delle nevi (1a). Analisi qualitativa dei termini off-diagonal mediante applicazione del metodo ESQ (1b).

Per la valutazione della pericolosità rischio associato alle interazioni reciproche dei termini off-diagonal si ricorre ad un codice ESQ modificato (Fig.1b) con valori da 1 (il parametro non ha effetti diretti) a 5 (il parametro condiziona fortemente).

La matrice di interazione può essere interpretata come un diagramma causa-effetto (C-E). Infatti la riga i-esima della matrice che comprende il parametro P_i rappresenta l'influenza di quel parametro su tutto il resto del sistema; viceversa, la colonna i-esima rappresenta l'influenza del sistema sul parametro P_i .

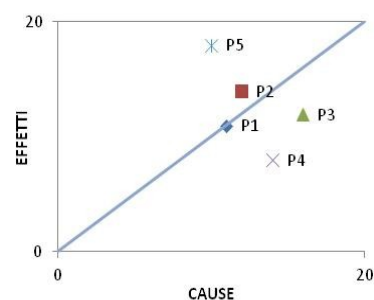


Fig.2. Diagramma Causa-Effetto e associata distribuzione dei parametri principali P_i .

La Fig.2 mostra la distribuzione dei parametri principali P_i della matrice di interazione sul diagramma causa-effetto (C-E): si nota come la barriera (P5) sia il parametro più interattivo e, allo stesso tempo, il più subordinato, mentre gli agenti esterni (P4) sono il parametro dominante. Alla pari della barriera, anche la morfometria del bacino (P3) risulta essere un parametro molto interattivo.

Fig.2. Diagramma Causa-Effetto e associata distribuzione dei parametri principali P_i .

3. Applicazione della matrice di interazione all'analisi di un sito soggetto a debris flow ricorrenti

Dall'analisi della matrice di interazione si è evidenziato come il detrito e la morfometria influenzano notevolmente la progettazione di una barriera soprattutto in termini di volumi mobilitati ed energie di impatto sviluppate; d'altro canto, la costruzione stessa della barriera altera il profilo del bacino e genera una nuova zona di accumulo potenzialmente instabile.

Nel seguito, il RES verrà applicato allo studio di debris flow ricorrenti nel bacino del Torrente Pellaud, sito nel comune di Rhemes-Notre-Dame (AO); in questo bacino distacchi di roccia ad alta quota causano un accumulo di detrito lungo il versante (interazione P1-P2 della matrice di interazione) che, soprattutto nel periodo primaverile, è reso instabile a causa dello scioglimento della neve (interazione P4-P2) ed originano colate di detrito con volumetrie comprese tra i 5000 e 15000 m³.

In questa analisi, particolare attenzione verrà posta sulla descrizione dei possibili cinematismi, delle volumetrie e sullo studio della propagazione della colata, utilizzando il codice di calcolo RASH^{3D} (Pirulli, 2010). Inoltre, partendo dai valori di velocità e altezza di flusso forniti dal codice di calcolo, si applicherà il modello analitico/numerico per la progettazione di barriere flessibili proposto dagli Autori (Brighenti et al, 2013).

3.1 Descrizione del codice di calcolo RASH^{3D}

Il codice di calcolo RASH^{3D} permette di ottenere analisi della propagazione di colate detritiche su bacini topografici complessi. È basato su un approccio della meccanica del continuo, ovvero, approssima la massa reale eterogenea ad un "fluido equivalente" monofase, le cui proprietà reologiche simulano il comportamento reale, e nell'ipotesi in cui l'altezza di flusso sia trascurabile rispetto alla lunghezza caratteristica del movimento, integra le equazioni di bilancio nello spessore ottenendo un sistema di equazioni che viene risolto ricorrendo ad un approccio ai volumi finiti. Per avviare un'analisi è necessario fornire al codice il modello digitale del terreno (DTM) precedente all'evento, la geometria del volume mobilizzabile e definire una legge di comportamento.

Il codice RASH3D permette l'utilizzo di due differenti reologie: una attritiva, in cui l'unico parametro da calibrare è l'angolo d'attrito del fluido equivalente (ϕ) e una reologia di tipo Voellmy, dove alla componente attritiva (μ) si somma l'effetto di una componente turbolenta (ξ).

3.2 Parametri e modello reologico

È stata individuata una zona di innesco con volume pari a circa 5000 m³ (Fig.3a); le analisi numeriche condotte, confrontate con le foto aeree disponibili, hanno evidenziato che la reologia Voellmy meglio approssima il comportamento di eventi passati di colate detritiche, sia in termini di altezza di deposizione che di distanza percorsa, ed inoltre permette di tenere in considerazione i tratti non rettilinei del bacino del T. Pellaud (Fig.3a). Viste le considerazioni precedenti, i parametri reologici scelti sono $\mu=0.05$ e $\xi=1000$ m/s² (Fig.3b).

Questa prima fase di analisi ha permesso di individuare due valori significativi, la velocità massima, v_{max} e l'altezza massima del flusso, h_{max} (Fig.3c e 3d) che consentono di quantificare gli effetti che il detrito e la morfometria hanno sulla barriera; h_{max} e v_{max} sono espressione delle caratteristiche del debris flow e in essi sono contenute, indirettamente, le informazioni sul volume, sull'energia potenziale e sull'energia di impatto. Tali grandezze sono i valori di input per il modello di progettazione delle barriere proposto dagli autori (Brighenti et al., 2013).

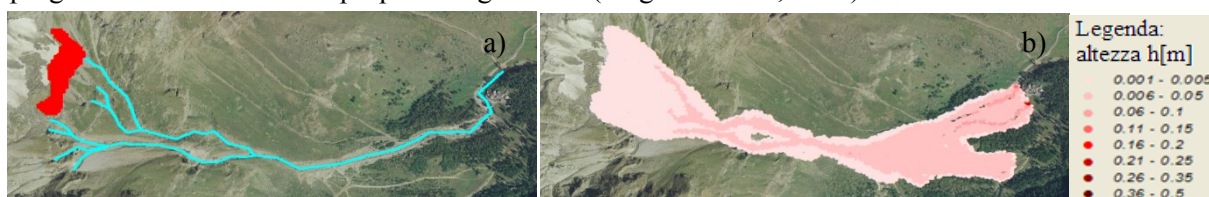


Fig.3

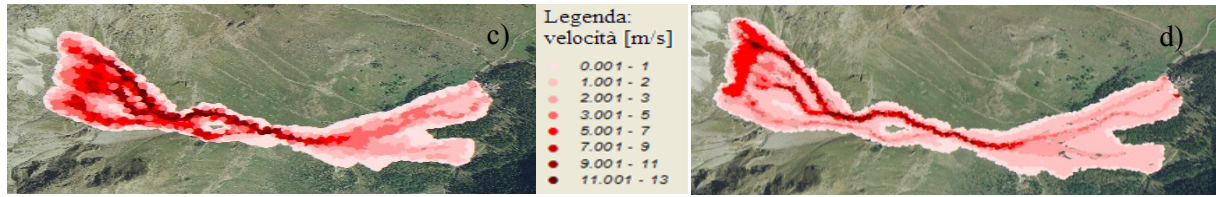


Fig. 3 Individuazione del volume potenzialmente instabile (3a). Risultati dell'analisi numerica con il programma di calcolo RASH3D: altezze di flusso al termine dell'evento di colata (3b) e altezze di flusso massime calcolate (3d). Velocità massime ottenute al termine dell'analisi del fenomeno (3c).

3.3 Modello analitico semplificato per il dimensionamento di barriere flessibili

Il modello è stato sviluppato per il dimensionamento di barriere flessibili a fune in grado di contrastare l'impatto di un debris flow. La pressione di impatto sulla barriera può essere determinata come somma di una componente dinamica e di una componente statica. La componente dinamica, dovuta all'impatto del flusso a tergo della barriera, ha la seguente equazione:

$$q_d(x) = \alpha \cdot \rho_d \cdot v_0^2 \quad (2)$$

dove α è un coefficiente empirico che varia tra 1.5 e 5 (Canelli et al., 2012), in questo caso assunto pari a 2, ρ è la densità del flusso e v_0 la velocità di impatto.

Al progredire del riempimento della barriera, il terreno esercita una pressione statica pari a:

$$q_s(d) = k \cdot d(t) \cdot \rho_d \cdot g = k \cdot (h_0 + h(t) - z) \cdot \rho_d \cdot g \quad (3)$$

dove k è il coefficiente di spinta, g è l'accelerazione di gravità, h_0 è l'altezza di flusso, z è la coordinata verticale del punto considerato e $h(t)$ è la quota di accumulo valutabile nel modo seguente:

$$h(t) = \sqrt{2 \cdot v_0 \cdot t \cdot h_0 \cdot \tan \theta}$$

con θ l'inclinazione del pendio a tergo della rete.

La barriera viene schematizzata come una successione di n funi equidistanti tra loro con passo $p = h_B / (n-1)$, sottoposte ad un carico $q_i(z_i)$ costante.

Tale modello si basa sull'equazione di equilibrio di una fune, vincolata alle due estremità, sottoposta ad un carico orizzontale e permette di ricavare le componenti delle forze di trazione agente (H e T) e il massimo spostamento orizzontale u_i .

3.4 Dimensionamento barriera flessibile

Analizzando l'andamento della colata nel tempo (Fig. 4), si è ipotizzata la realizzazione di una rete para-debris flow quota 2000 m, con lunghezza pari a 20 m e altezza di 5 m. La barriera si compone di 5 funi portanti con interasse 1.25 m, sezione di 0.024 m² e modulo elastico pari a 210 GPa, dotate di dissipatori meccanici che si attivano con forze di trazione superiori ai 70 kPa in grado di allungarsi fino a 2 m.

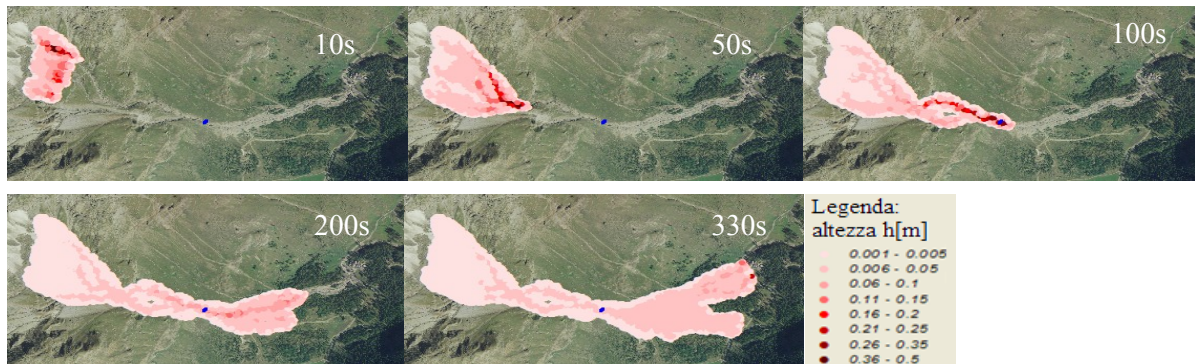


Fig.4 Evoluzione del processo di colata ad istanti successivi e posizionamento della barriera (in blu).

Utilizzando i valori di altezza e velocità di flusso rispettivamente pari a $h_0 = 0.26$ m e $v_0 = 11.00$ m/s si sono ottenuti i risultati di trazione massima agente su ogni fune e deformazione massima rispetto alla mezzeria della rete (Grafici 1a e 1b).

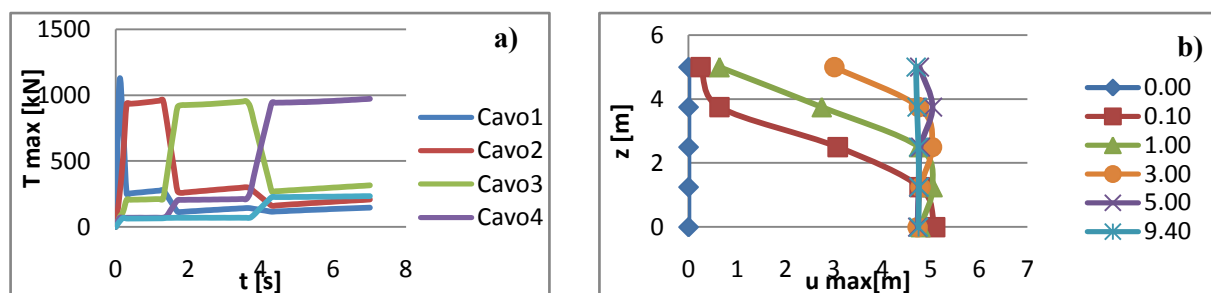


Grafico 1. Andamento della forza di trazione massima agente su ogni cavo della barriera al variare del tempo (a). Deformata massima della barriera a differenti istanti durante l'impatto. (b)

In realtà il modello fornisce numerosi dati di output, quali l'allungamento dei dispositivi di dissipazione, il carico istantaneo trasferito dal flusso alla barriera, l'energia dissipata e quella totale (cfr Brighenti et al, 2013), non riportati in questa nota.

4. Conclusioni e sviluppi futuri

In questa nota si è presentato un metodo approfondito e accurato per analizzare l'interazione tra un fenomeno di colata detritica in ambiente alpino e una barriera flessibile.

A tal proposito è stata redatta una matrice di interazione, strumento base del Rock Engineering System (RES), che ha permesso di individuare i parametri principali che interagiscono nel sistema colata-opera di protezione.

Il RES, vista la sua semplicità di applicazione e l'immediatezza interpretativa, risulta essere uno strumento potente per l'individuazione dei percorsi di interazione soggetti a un elevato valore di

L'applicazione del RES ai debris flow caratteristici del Torrente Pellaud (AO), ha consentito di evidenziare come la morfometria del bacino e i volumi mobilizzabili di detrito, legati all'azione di riduzione della coesione dovuta al disgelo nel periodo estivo, influenzino notevolmente la pianificazione e la progettazione di una barriera.

Nel presente studio, sono state fornite delle semplici linee guida atte ad ottenere un corretto dimensionamento di un'opera di protezione flessibile. Tali linee guida prevedono l'applicazione del codice di calcolo numerico RASH^{3D} (Pirulli, 2010), per la definizione dei parametri reologici della colata e delle caratteristiche del flusso (altezza e velocità di flusso), e il modello analitico-numerico (Brighenti et al, 2013) per il dimensionamento della barriera a funi.

Sviluppi futuri dovranno essere volti ad un approccio accoppiato, in quanto i modelli numerici proposti presentano, seppur a favore di sicurezza, delle limitazioni sia nella simulazione del comportamento fisico-meccanico della colata sia nella descrizione della dinamica dell'impatto e della risposta della barriera.

Bibliografia

- Brighenti R., Segalini A., Ferrero A.M. (2013). "Debris flow hazard mitigation: a simplified analytical model for the design of flexible barriers". *Computers and Geotechnics*, 54, 1-15
- Canelli L., Ferrero A.M., Migliazza R., Segalini A. (2012). "Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers - experimental tests and impact analysis". *Natural Hazard and Earth System Sciences*. 12, 1693-1699
- Hudson J.A. (1992). *Rock Engineering System: theory and practice*. London: Ellis Horwood. New York.
- Pirulli M. (2010). "Chapter 4. Continuum Description of Flow-like Landslide Dynamics", In: *Continuum Mechanics*, Andrus Koppel and Jaak Oja (eds), Hauppauge, New York: Nova Science Publishers, Inc., 105-146. ISBN: 978-1-60741-585-5